

위험성 평가에서의 Decision Table의 응용

The Application of Decision Table for the Risk Assessement

김진곤* 김광일**

I. 서 론

위험성 해석의 주된 목표는 시스템의 고장이나, 인명, 경제 및 주변환경의 피해의 가능성을 줄이는 것이다. 인명손실은 사망, 부상 및 불구를 포함하고, 경제적 손실은 생산의 중단, 생산품의 불량, 시설 자본의 손실등을 포함하고 있으며, 주변환경의 손실은 대기과 수질오염, 냄새, 진동, 소음등의 환경 공해를 예로 들을 수 있다.

하나 또는 그이상의 기초 결합사상(basic failure event)이 시스템의 재해를 일으킬 때 손실이 발생한다. 이 기초 결합사상이 발생하는 가장 공통적인 3가지 형태는 다음과 같다.¹⁾

- 1) 인간과 관련된 사상
 - 가) 운전자 실수
 - 나) 설계 실수
 - 다) 정비 실수
- 2) 장치과 관련된 사상
 - 가) 밸브로 부터 유독물질의 누출
 - 나) 모터에서의 윤활유 누출
 - 다) 센서의 부정확한 측정
- 3) 환경과 관련된 사상
 - 가) 지진 혹은 지반 침몰
 - 나) 폭풍, 홍수
 - 다) 스파크등에 의한 점화

시스템 재해는 빈번하게 이러한 여러 결합형태의 조합으로 야기된다. 즉 인간과 장비 에러, 혹은

환경등이 복합되서 형성된다. 재해와 위험을 최소화하기 위한 전형적인 대책들은 다음과 같다.

- 1) 보조 장비
- 2) 검사와 정비
- 3) 스프링 클러, 방화벽, 안전밸브, 비상냉각 시스템과 같은 보호장비
- 4) 경보 시스템

한편, 화학공정이 복잡해지고, 대형화 할수록 안전에 대한 중요성은 더욱 증대한다. 따라서, 복잡한 현대적인 플랜트는 안전과 신뢰성을 평가하기 위한 더 세밀한 기술을 요하고 있으며, 그 원인은 다음과 같다.

1. 공정단위의 증가
2. 에너지의 회수와 재사용이 복합된 더욱 복잡한 공정
3. 중간 저장능력의 감소
4. 제어의 중앙 집중화
5. 컴퓨터에 의한 운전의 증가
6. 장비의 복합성
7. 인구 밀집 지역예의 프랜트 설치

이러한 경향은 경제적 단위, 프랜트 운전의 정밀한 제어, 수송비용의 감소와 관련된 이윤의 증대를 암시하고 있다. 한편, 운전자의 능력의 증대에 따른 공정의 고유의 제한조건 부근에서 경제적 운전이 가능하도록 설계되고, 일체화된 제어방식을 사용하고, 비싼 프랜트의 shut down대신 직접적인(on-line) 정비, 컴퓨터를 사용한 직접적인(on-line) 공정 최적화를 수행을 의미한다.

프랜트당 전투자비는 경제단위와 함께 크게 증가한다. 이것은 심각한 공정의 결합이 발생하면,

* 한국항공대학교 기계설계학과 부교수

** 인제대학교 산업보건학과 교수

매우 큰 손실의 발생에 대한 잠재적 증가를 동반하고, 공정의 결합은 특정된 프랜트의 경제적 손실보다 훨씬 넓은 범위의 충격을 내재하고 있다. 한편, 프랜트의 크기와 복잡성의 증가와 함께, 공정결합에 대한 잠재적인 증가가 수반되고 있다.

결국, 재해의 연구는 시스템의 고장을 일으키는 인간, 장비, 환경 사이의 원인적 관계를 정의하고, 시스템 설계나, 개선에 의해 이의 충격을 개선시키는 것이 주 목적이다. 따라서, 시스템 재해에 대한 체계적인 연구는 재해발생의 원인적 관계를 밝히는 것과, 이 재해에 의해 결과를 예측하는²⁾ 것으로 크게 나누어 볼 수 있다. 원인적 관계에 관한 것으로 이는 정성적, 정량적으로 해석할 수 있는 fault tree에 의해 수행될 수 있다. 한편, 다음절에서 논의 되는 바와 같이 FT해석의 단점을 극복하기 위해 decision table에 의한 방법이 개발되었고³⁾, 이를 이용하여 재해를 일으키는 원인들의 조합을 찾는 방법을 살펴보고, 이에 대한 예를 제시하였다.

II. Fault Tree(FT) and Decision Table

원인적 관계를 조사하는데, forward analysis와 backward analysis가 있다. Forward 해석은 요소의 결합을 지정하고, 이의 파급되는 효과를 찾아서 가능한 시스템의 최종결합을 찾아내는 수법으로 ET(event tree), FMEA(failure mode and effect analysis), CA(criticality analysis), PHA(preliminary hazards analysis)등이 이에 속한다.

한편 backward 해석은 시스템의 재해를 상징하고 그원인을 추적해가는 방식으로 FTA와 decision table이 이에 속한다.

FT는 1961년 Bell Telephone Laboratories의 H. A. Watson에 의해서 개발되었다. 이 방식은 Minuteman Missile의 발사 제어 시스템을 평가하는데 사용되었다.⁴⁾ 이후, 항공우주 분야에 적용되었으며, 다른 산업에 응용되고, 특히 1974년 상업용 원자력 프랜트의 위험성 평가에 적용되었다.⁵⁾

Fussel에 의하면 FT해석은 다음과 같은 장점

을 갖고있음을 제시하였다.⁶⁾

1) 직접적으로 결합을 추출할 수 있는 해석이 가능하다.

2) 주어진 결합에 대한 중요성을 시스템의 관점에서 지적할 수 있다.

3) 시스템의 설계 변경에서 제외되는 시스템 관리 사항을 시각적인 그래프로 나타낸다.

4) 시스템의 정량적이고, 정성적인 해석을 할 수 있다.

5) 시스템의 거동에 대한 사항을 알 수 있다.

FT에서는 원치않는 사상이 정상사상(Top event)으로 나타나고, 이것은 사상상태와 logic gate에 의해 여러 기초 결합사상들로 연결되어 있다. 이 방식은 원치않는 사상이나 사고를 일으키는 시스템의 요소와 사상의 정의의 해석에만 제한되어 있는 FMEA와 같은 것에 비해 더 큰 장점이 있음을 알 수 있다.

한편, decision table은 FT보다 많은 장점을 갖고있으며, 그 대표적인 것은 다음과 같다.

1) 부품의 여러형태의 결합을 나타낼 수 있다. 즉, FT는 Boolean 논리표에서 밸브의 작동, 고장의 상태만을 나타내는데 반해서, decision table에서는 밸브 출력의 감소라는 추가적인 상태를 나타낼 수 있다.

2) 제어루프를 갖는 시스템에서, 결합상태의 시간 혹은 연속성은 매우 중요하다. FT에서는 이문제를 처리하기가 매우 어려운 반면, decision table에서는 직렬제어회로와 같은 복잡한 시스템에도 아주 쉽게 적용할 수 있다.

FT가 대단히 커질때, 실수를 발견하기 어렵고, 추적하기도 매우 힘들다. 따라서, decision table을 이용한 위험도 해석의 한 방법을 제시하고자 한다.

기존의 확률적 위험도 해석은 어느 특정된 사상(event)에 대하여 Fault Tree를 구성하고, 이 사상을 유도하는 기초 사상들의 집합(cut set)을 얻고, 발생 확률을 구한다. 이를 위한 여러 형태의 컴퓨터 코드가 개발되어 있다.

이들은 공통적으로 복잡한 시스템의 해석에도 쉽게 자동화 할 수 있는 체계적 방법이 요구되며, 이에따른 몇개의 방법이 있다. 첫번째는 Fussel⁷⁾

에 의해 개발된 방법이다. 부품의 FT로부터 시스템의 FT를 자동적으로 구한다. 이 방법은 단지 binary 상태를 갖는 전기 시스템에 적용되고, loop가 없는 coherent 시스템에 적용된다. 두번째는 Powers, Tompkins⁸⁾에 의해 digraph를 기본으로 구성된 방법이 있다. 이것은 부품의 failure mode로부터 작성된 digraph에 의해 FT가 작성된다.

세번째로는, Apostolakis⁹⁾에 의해 개발된 CAT code이다. 이 방법은 부품의 decision table을 갖고 시스템의 FT를 구성하며, 이렇게 성립된 FT는 작동상태를 포함하고 있으나, 이 작동상태를 제거하지 않고서는 prime implicant(계의 유일한 failure mode)를 얻을 수 없다. 위의 방식들은 동일한 목표를 갖고 있다. 즉, FT를 자동적으로 구하고, 이 FT로부터 최종 사상을 유도하는 기초 사상들의 집합을 얻는 것이다. FT가 구성되고 난후, 기초사상들은 확율을 계산하기 전에 테이블 형태의 computer code로 전환된다.

Kumamoto, Henley¹⁰⁾는 Apostolakis의 decision table조합은 중간단계로 FT의 구성없이 직접적으로 failure mode를 구할 수 있음을 밝히고, 제어시스템에도 적용할 수 있음을 보였다. 시스템의 부품은 decision table로 모델화 하고, 기초사상군은 시스템의 부품들간의 상호 연결성을 이용해서 table의 조정을 통해 얻을 수 있다. Table은 사건이 발생되기 위해 존재하는 조건을 나타내고 있는 것이다. 이러한 사건들은 부품-요소장비, 장치, 부시스템, 전 시스템-의 출력으로 취급할 수 있다. 이러한 세트를 포함하고 있는 decision table를 Critical Transition Table라고 부른다.

정상사상(Top event)의 확율은 minimal cut set라 부르는 시스템의 유일의 failure mode를 사용해서 계산된다. FT가 작동상태를 포함하고 있을때는 minimal cut set는 유일한 failure mode로 취급할 수 없다. 따라서, Bennetts⁶⁾는 minimal cut set 개념은 sum of product형식의 prime implicant로 대체됨을 제시하였다. Prime implicant는 최종사상을 일으키는 필요, 충분 조건을 갖는 기초사상들의 결합체이다. 임의의 기능

의 prime implicant는 유일하고, 유한하다. Critical Transition Table는 최종사상에 대한 sum-of-expression이기 때문에, 최종 사상에 대한 prime implicant는 테이블로부터 생성될 수 있다. 따라서, 여러 상태의 변수를 갖는 decision table의 가장 간결한 형태를 얻고, 이로부터 형성된 알고리즘을 근거로 Critical Transition Table를 얻고 Critical Transition Table로부터 얻은 failure mode 와, 일반적인 FT로부터 얻은 cut set와의 관계를 정립하고, 여러상태의 변수를 갖는 기능의 prime implicant의 생성을 PITE 코드를 이용하여 얻었다. 또한, control loop를 갖는 시스템을 예로 안전도 해석을 수행하였다.

III. 불대수(Boolean Expression)의 응용

Decision table은 진리표를 확대한 것이고, 진리표를 간략화 하는데 사용되는 법칙들은 약간의 수정을 거쳐 적용될 수 있다. 기본적인 몇가지 방식을 열거하면 다음과 같다.

1. Absorption

ϕ_2 의 모든 입력이 ϕ_1 에서도 나타나며, 두항이 동일한 출력을 갖는다면, ϕ_1 은 ϕ_2 의 subsum이 되고, 큰항 ϕ_1 은 표로부터 제거되고, 작은항에 흡수된다.¹¹⁾

$$A (+) (A * B) = A$$

여기서, '(+)'는 OR gate를 나타내고, '*'는 AND gate를 나타낸다.

진리표에서는 다음과 같다.

A	B	≡	A	B
T	-		T	-
T	T			

2. Merging

표에서 2개의 항이 같고, 단지 한개의 입력이 반대의 값을 갖는다면 병합된다.¹²⁾

$$A\bar{B} (+) AB = A$$

A	B	≡	A	B
T	F		T	-
T	T			

여러상태의 입력 변수에 대해서도 동일하게 간략화 할 수 있다.

$$\prod_{i=1}^n A_i P_i = A_j$$

A	P	≡	A	P
W	0		W	-
W	-1			
W	2			
W	-2			
W	1			

3. Reduction

진리표에서 한변수를 제외하고 두항의 변수가 대등하고, 반대의 부호를 갖는 변수가 있다면, 이 변수에 의해 다음과 같이 간략화 된다.

$$ABC (+) A\bar{B} = AC (+) A\bar{B}$$

A	B	C	≡	A	B	C
T	T	T		T	-	T
T	F	-		T	F	-

초기표				간략화된 표			
A	B	C	D	A	B	C	D
W	N	F	W	W	-	F	W
-	F	-	W	-	F	-	W
W	R	-	-	W	R	-	-

$$\prod_{j=2}^m A_j B_j (+) \prod_{l=m+1}^n A_l B_l (+) B_l C_j$$

$$= \prod_{j=2}^n A_j C_j (+) \prod_{l=m+1}^n A_l B_l (+) B_l C_j$$

4. Reduction - Merging

초기표			간략화된 표		
A	B	C	A	B	C
2	-	1	2	-	1
2	1	1	-	-1	1
-	1	1			

$$\prod_{j=2}^k A_j B_j C_j (+) \prod_{l=k+1}^m A_l B_l C_l (+) \prod_{l=k}^n A_l B_l (+) B_l C_j$$

$$= \prod_{l=k+1}^m A_l C_l (+) \prod_{l=m+1}^n A_l B_l (+) B_l C_j$$

이러한 간략화는 decision table에서 더이상 줄일 수 없을 때까지 수행한다.

5. Prime Implicant

어느 함수의 prime implicant는 간략화 방법에 의해 더이상 문자의 수를 줄일 수 없는 함수이다. 따라서, 시스템의 기본 사상의 prime implicant는 간략화 방법에 의해 더이상 입력 수를 줄일 수 없는 critical transition table에 해당된다. 따라서, 부품의 여러상태와 연속적인 상태가 있다면, critical transition table은 완전한 prime implicant set를 갖고 있다고 보장 할 수 없다. 이를 나타내는 여러 알고리즘이 존재하나, Quine^{(11), (13)}의 것이 가장 단순하다. Quine의 이론은 binary변수들의 함수의 prime implicant를 구할 수 있고, 다상태의 변수에 대해서도 구할 수 있다. 이 방법은 입력사상들의 조합에 의해 만들어진 항들에서 새로운 항들을 생성하기 때문에 consensus operation이라 부른다. 여러 상태를 갖는 변수에 대해 적용할때 다음과 같다.

변수P의 n 사상이 주어지고, $P_i \Psi_i$ 형태의 n prime implicant가 주어졌다면, Ψ_i 역시 prime implicant 이다. 여기서, Ψ_i 는 P_i 와 관련된 다른 변수들의 조합이다.

$$\prod_{i=1}^n (\Psi_i) \Psi_i = \Psi_1 \Psi_2 \Psi_3 \dots \Psi_n$$

$$\prod_{i=1}^n P_i \Psi_i = \left(\prod_{i=1}^n P_i \Psi_i \right) \left(\prod_{i=1}^n \Psi_i \right)$$

이와같이 $(\Psi_i) \Psi_i$ 역시 prime implicant이다. 이것이 empty set로 줄어든다면 이항은 중복되는 항이다. 이것이 empty set가 아니면, 표내의 기존의 항들의 subsum이 아닌 상태로 prime implicant에 가해진다.

모든 가능한 새로운 항들이 초기의 간략화된 critical transition table로 부터 도출될 때, 표는 다시 간략화 된다.

이상의 진행을 새로운 consensus항이 없을때 까지 반복해서 수행한다. Quine은 이러한 진행이 완료되면, 표는 기본사상의 모든 prime implicant를 포함한다는 것을 증명하였다. 이에대한 예

는 다음과 같다.

ROW	P	Q	R	TOUT
1	T	F	-	2
2	F	T	-	2
3	-	T	F	2
4	-	F	T	2

이표는 간략화된 것이다.

1열과 3열은 다음과 같이 consensus를 허용한다.

$$\Psi_1 = P ; \Psi_1 = \bar{R}$$

R는 F를 의미한다.

$$\Psi_1\Psi_3 = P\bar{R}$$

$\Psi_1\Psi_3$ 에서 중복되는 입력이 없으므로, 1열과 3열의 consensus는 $P\bar{R}$ 이 된다. $P\bar{R}$ 는 기존의 어느 항에 대하여 subsum이 아니므로 표에 추가된다.

마찬가지로 2,4열은 추가로 $P\bar{R}$ 을 허용한다. 따라서, 표는 다음과 같이 된다.

P	Q	R	TOUT
T	F	-	2
F	T	-	2
-	T	F	2
-	F	T	2
T	-	F	2
F	-	T	2

이표는 더이상 간략화 할 수 없으며, 새로이 추가될 consensus도 없다. 따라서, 이표는 최초사상의 모든 prime implicant를 포함하고 있다.

6. 삽입법에 의한 중간 변수 제거

6.1 삽입법에 의한 간략화³⁾

여러상태를 갖는 변수들로 구성된 함수 Y는 다음과 같이 대수적으로 나타낼 수 있다.

$$Y = A_1B_3E_1 + A_2B_2$$

여기서,

$$A_1 = -1; A_2 = 0; A_3 = +1 : A \in [-1, 0, +1]$$

$$B_1 = 0; B_2 = +1; B_3 = +2 : B \in [0, +1, +2]$$

$$E_1 = -1; E_2 = 0; : E \in [+1, 0]$$

이다.

$$E_1 = C_3D_1 + C_1D_3$$

라고하고,

$$C = -1; C = 0; C = +1 : A [-1, 0, +1]$$

$$D = 0; D = +1; D = +2 : A [0, +1, +2]$$

이라면,

$$Y = A_1B_3C_3D_1 + A_1B_3C_1D_3 + A_2B_2$$

가 된다.

이와같이, 변수 E를 변수 C, D를 사용해서 제거할 수 있다.

이방법은 몇몇 변수들의 sum-of-product인 함수가 표형식으로 표현된 것이 decision table이기 때문에 decision table 내에서 수행하는 것이 가능하다. 이를 표로 표현하면 다음과 같다.

표 1				표 2		
A	B	E	Y	C	D	E
-1	+2	+1	+2	+1	0	+1
0	+1	-	+2	-1	+2	+1

표 3				
A	B	C	D	Y
-1	+2	+1	0	+2
-1	+2	-1	+2	+2
0	+1	-	-	+2

표1과 표3은 동일한 것이다. 일반적으로, decision model을 구성하는데 있어서 시스템 부품의 모델이 주어지면, 시스템의 주어진 정상사상에 대한 완전한 표현을 얻을 수 있다. 중간변수가 제거된 기초변수 혹은 상태변수로 정상사상을 표현할 수 있다. 따라서 부품의 모델이 정확하다면, 최후로 얻어진 표는 기초나 상태변수로 구성되서 정상사상에 대한 완전한 표현을 얻을 수 있다.

6.2 Consistency check and event combination

최종사상표로 부터 중간변수를 소거하는 동안 반복되는 변수들이 빈번히 나타난다. Decision table의 모든항들은 열(row)쪽의 사상들의 조합

는 다음이기 때문에, 같은 변수가 나타나는 2 column의 입력들은 불대수 사용해서 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_i \times A_i &= A_i \\
 A_i \times A_j &= 0 \quad i \neq j \\
 A_i \times (A_i \times \Psi_R) &= A_i \times \Psi_R \\
 A_i \times (A_j \times \Psi_R) &= (A_i \times A_j) \times \Psi_R = 0 \\
 &\quad i \neq j \\
 A_i \times 1 &= A_i
 \end{aligned}$$

A_i 는 변수 A의 서로 다른 상태를 나타낸다. Ψ_R 은 A_i 를 포함하고 있는 열에서의 다른 변수들의 조합을 나타낸다.

이러한 조합이 empty set로 나타나면 사상들의 조합이 나타나지 않기 때문에 이열들은 표로부터 소거된다. 또한 이러한 조합이 최종사상표에서 동일한 열들을 만들 수도 있다. 다음과 같은 상황이라면, 동일한 열들이 나타날 수도 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Row } k &: A_i \Psi_k A_i \\
 \text{Row } l &: \Psi_l A_i \\
 \text{Row } m &: A_i \Psi_m
 \end{aligned}$$

Row k는 $A_i \Psi_k$ 가 되고, Row l은 $A_i \Psi_l$ 이 되며, Row m은 $A_i \Psi_m$ 이 된다.

Ψ_k, Ψ_l 그리고 Ψ_m 이 같은 사상들의 조합이라면 즉 $\Psi_k = \Psi_l = \Psi_m = \Psi$ 이라면, 위의 3열들은 동일해진다. 이와같이해서,

$$\begin{aligned}
 Y &= \text{Row } k (+) \text{Row } l (+) \text{Row } m \\
 &= A_i \Psi (+) A_i \Psi (+) A_i \Psi \\
 &= A_i \times (\Psi (+) \Psi (+) \Psi) \\
 &= A_i \Psi
 \end{aligned}$$

가 된다. 이것은 다음과 같이 표로 표현된다.

PO1	PO1	PO3	TOUT
2	-	0	2
2	2	0	2
2	1	0	2

PO1이 2번 발생하므로 column내의 입력을 조정하면 다음과 같다.

PO1	PO3	TOUT
2	0	2
2	0	2

여기서 column PO1의 입력이 상호 모순되기 때문에 처음표에서 3열은 제거된다.

두열이 동일하므로 단지 한열만 남게된다. 이러한 동일한 2열의 출현은 다수의 출력을 갖는 부품이 있는 시스템에서 나타난다. 그러므로, 이러한 경우 column을 조합한후 매번 동일한 2열의 검사를 실시해야한다.

IV. Component modelling : method of decision tables

부품의 결함은 원인적 관계의 해석에서 기본적인 문제이다. 이런 결함은 1차결함(primary fault), 2차결함(secondary fault), 명령결함(command fault)의 3가지로 분류된다.

1차결함은 부품의 비작동상태를 의미하고, 이러한 결함은 계산할 수 있으며, 수리로 작동상태를 회복할 수 있다. 일차결함은 설계범위의 입력조건 하에서 발생하고, 부품의 자연적인 노후화가 이 결함에 주된 원인이다.

2차결함은 1차결함과 동일하나, 결함을 계산할 수 없다. 부품에 과도한 스트레스가 작용할때 2차결함 발생의 주된 원인이 된다. 이 스트레스는 에너지입력, 기타 변수들이 제한조건들을 초과하는 것을 의미한다. 그리고 스트레스는 주변부품이나, 환경조건으로 부터 야기되기도 한다. 또한 운전자나, 검사가가 2차결함의 원인이 되기도 한다.

명령결함은 부적절한 신호 혹은 소음등에 의해 부품이 비작동 상태인 것을 말하고, 부품을 정상상태로 되돌리기 위해 수리를 필요로 하지 않는다.

한편, 안전도 해석을 수행하기 위해서는 시스템의 움직임에 대한 적절한 묘사가 있어야 한다. 일반적인 공정의 흐름은 특정된 형식으로 서로 연관된 유니트로 구성된 네트워크로 취급된다. 이것은 시스템의 움직임을 모델화 하는데 있어서, 흐름도를 기본단위로 나누고, 각각의 유니트를 모델화해서, 최종으로 이들을 묶는 형태로 할 수 있다. 이 절은 유니트 모델 혹은 위에서 제시한 여러 형태의 부품의 결함에 관한 모델의 개발에 관한 사항을 다룬다.

우선, 각 유니트들은 그 움직임을 알기 위해 물질, 에너지, 운동량의 관계를 정의해야 한다. 이들의 관계를 정의하는 몇가지 방법이 있다.⁸⁾ 극단적으로 한 유니트는 일반적인 물질, 에너지 운동량의 비정상 미분방정식으로 모델화 된다. 이런 수준의 묘사가 적절히 이루어 졌다면, 안전한 상태에서 위험한 상태로 공정의 움직임을 정확히 예측할 수 있다. 이러한 모델의 예는 핵 반응기의 비상 냉각 시스템에 적용되었다.¹⁴⁾

그러나 단점은 다음과 같다.

1. 복잡하고, 물질과 시스템의 장치의 특성에 대한 너무 많은 정보를 요한다.
2. 때때로 정확한 해를 얻기가 어렵다.
3. 특정된 운전 영역과 특정된 결합 형태에 제한을 받는다.

이러한 단점중에서 세번째의 것이 가장 중요하다. 상세한 동적인 해석이 된 상태에서 재해가 정의 되면, 결합 형태는 잘 이해 될 수 있다. 그러나 이런 모델이 예측할 수 없는 것은 예견되지 않은 결합 형태이다.

다른 형태의 모델은 검출되지 않은 결합형태를 찾아내는 것이 필요하다. 정보흐름은 이 문제에 이상적으로 적합하다. 먼저, 정보흐름은 공정의 유니트를 특성짓는 변수들이 유니트가 공정 네트워크와 연결되는지를 간단하게 나타낸다. 여러 부품의 공통적인 변수에 의해 공정 시스템의 한 부품에서 다른 부품으로 한 부품의 출력이 다른 부품의 입력이 되어 흐른다. 이러한 정보의 흐름은 시스템의 정보흐름의 구성을 도출하고, 안전에 관련된 문제를 찾게 해준다.

간단한 정보 흐름 모델은 단지 특정한 출력 변수이 여러 입력 변수들에 의존됨을 나타낸다. 의존도의 수량화는 단위공정을 묘사하는 방정식의 해에 의존된다. 방정식의 해는 변수 변화의 방향과 양을 결정한다. 정확한 해를 근사화 하는 것도 가능하다. 예로, 안전도 해석에서 가끔 출력이 입력에 대한 정확한 특성이 알려져 있지 않아도 의존 사실 만으로도 충분하다. 이러한 정보는 변수의 상호작용에 의존되는 가능한 모든 결합을 고려할 수 있게 한다. 이것은 결합 형태의 확대를 피할 수 있는 매우 중요한 사항이다. 따라서, 유니트의

양상에 관한 변수간의 관계, 원인과 효과를 간단한 이론으로 부터 안다는 것은 정상적인 안전 해석 진행에 공헌한다. 이것은 특히 프랜트의 특정된 부분이 단순한 이론에 의해 도출된다 하더라도 심각한 영향을 미치지 않는것을 의미한다.

시스템을 묘사하는 식의 해에 대한 두번째 근사는 변수간의 연계와 의존 부호(+, -)를 제시한다. 이 정보로 재해의 상황으로 유도되는 변수들의 변화의 방향을 설정할 수 있다. 마지막으로, 변수들의 연계, 방향, 양들을 안다면, 시스템의 움직임에 대한 수량화가 가능하다.

더 정밀한 단계는 변수들의 상호작용관 관련해서 동적인 묘사를 포함하고 있다. 초기 안전해석에서 정상 상태의 물질, 운동량, 에너지 평형을 기초로한 간단한 정보흐름만으로도 충분하다. 이러한 모델로, 화학 공정 시스템에서 안전의 경향에 관련된 많은 것을 얻을 수 있다.^{15),16)}

FT해석을 수행하기 위하여는 시스템의 성능을 나타내는 모델 뿐만 아니라, 결합형태를 나타내는 모델도 필요하다. 분할적인 접근방법에서 결합모델은 유니트의 성능 모델과 관련이 있다. 유니트 모델을 나타내는 틀에서, 결합 모델은 각 유니트에 대해서 물질, 운동량, 에너지 평형의 실패로 간편하게 나타낸다. 이것은 특별한 결합상태를 나타낼때, 이러한 평형이 성립되지 않는것을 의미하는 것이 아니라, 원 지않는 조건에 있음을 의미하는 것이다.

각각의 평형과 관련된 것은 시스템의 상태를 나타내는 기본 변수이다.

1. 물질 평형 : 화학 성분(농도, 유량)
2. 에너지 평형 : 온도
3. 운동량 평형 : 압력

결합 상태는 온도, 압력, 화학 성분중의 어느 하나 혹은 여럿이 제한된 조건하에 있지않는 상태이다. 각각에 대한 일반적인 결합상태는 표4에 나와 있다. 표4에 제시된 것은 즉각적인 원인적 요소들이지, 필수적인 기본결합이 아니다. 예를들면, 에너지 균형의 결합은 운동량 균형의 결합에 의존될 수 있는 물질 균형의 결합의 결과 일 수도 있다.

일반적인 결합형태는 특정된 유니트의 정립 가능한 특정된 결합모델을 갖는 틀을 제공한다.

Decision table은 진리표의 확장된 형식이다. 모든 프로그램은 비록 진리표가 명확하게 나타나진 않지만, 2진수 논리(true-false)의 진리표 형태를 채택하고 있다. 그러나 2진수 논리는 많은 중요한 물리적 시스템을 충분히 묘사하지 못한다. 예를들면, 경수 반응안전 시스템은 전형적으로 저압, 고압의 물분사 시스템으로 되어있다. 심각한 재해는 1차영역의 압력과 저압영역이 서로 연결될 때 발생한다. 이와같이, 어느점에서 물의 압력은 3상태로 정의할 수 있다. 이 상태들은 'no pressure', 'low pressure', 'high pressure'이다. 그러나 입력변수들의 변화에 대한 출력변수의 변화는 위에서 논의한 바를 decision table을 사용해서 쉽게 해결할 수 있다. 그리고, decision table은 여러 상태를 표의 입력군으로 사용할 수 있다. 단지 이러한 상태값이 물리적의미를 갖추어야 함이 요구될 뿐이다.

부품은 개별적으로 모델화된 가장 작은 요소이고, 이것은 정비, 설비 혹은 부시스템 또는 시스템이 된다. 부품에 있어서 가장 중요한 것은 한개의 출력을 갖는 한개의 decision table로 정확하게 모델화 하는 것이다. 부품이 여러개의 출력이 나올때, decision table은 출력 column에서 다른출력과 함께 구성되어야 한다. 시스템은 부품들과의 연계성으로 묘사된다. 각부품들의 출력은 연계된 부품의 입력으로서 연결된다. 부품의 출력이 여러 연계된 부품에 연결되어 있다면, 그 부품의 decision table은 매번 시스템의 해석에서 나타나는 출력 data로서의 역할을 한다. 부품이 평행하게 연결되어 있으면, 그들의 출력은 node에서 연결된 출력들의 여러 조합에 의해 얻어진 논리적 상태를 나타내는 가상적 출력을 갖는 가상적 부품으로 모델화 된다.

시스템 변수는 3종류로 나누어 진다. 시스템내의 부품으로 부터의 출력은 중간 변수(intermediate variable)라 부르고, time delay의 출력은 상태(state) 혹은 기억(memory) 변수라 한다. 시스템 환경 혹은 시스템부품의 내부형태인 변수는 기초(primary)라 한다. 부품의 내부 형태는 그의 기능을 나타낸다. 가장 간단한 형태는 'working', 'failed'이다.

표 4. General Failure Modes for Chemical Processing Equipment⁸⁾

1. Material balance failures (species related)
 - A. Routing-(wrong flow path)
 - B. Flow
 1. Low
 2. High
 3. Wrong direction
 - C. Leakage
 1. Internal
 2. External
 - D. Species(not normally present in system or environs)
 - E. Reaction
 1. Undesired side products
 2. Incorrect conversion
 3. Wrong location
 4. Wrong reaction
2. Momentum balance failures (pressure related)
 - A. Reaction
 1. Gas release
 2. Gas consumption
 - B. Pressure sources
 - C. Species (Vapor pressure)
 - D. Pressure sinks
 - E. Leakage
 1. Internal
 2. External
 - F. Phase changes
3. Energy balance failure (temperature related)
 - A. Reaction
 1. Endothermic
 2. Exothermic
 - B. Internal heat sources
 - C. Phase changes
 - D. External heat sources
 - E. Frictional heat sources (rotating equipment)
 - F. Leakage
 1. Internal
 2. External
 - F. Fouling of transfer surfaces

정상사상(top event)은 해석되는 시스템의 failed(or successful)상태를 정의하는 사상이다. 이것은 시스템의 중간변수의 사전에 정해진 값이 된다. Critical transition table은 출력으로 중간변수를 갖는 부품의 decision table의 모델을 갖고 시작한다. 출력으로 정상사상을 포함하는 de-

cision table은 정상사상표라 부른다.

위험도 해석에 대한 기존의 접근 방식은 정확한 decision table을 지나치게 요구하지 않는다. 매우 중요한 점은 부품기능에 대한 decision table 모델이다. 왜냐하면, 이것이 최종사상의 prime implicant을 직접 유도하기 때문이다. 기본적으로 decision table를 생성하기 위한 2가지 방식이 있다. 하나는 가능한 출력상태를 모든 가능한 입력상태로 추적해가는 연역적인 방법이다. 이 방식의 결점은 완전한 table을 만들지 못할 수도 있다는 것이며, 특히 매우높은 가능성의 사상과 원치않는 사상이 decision table에 포함되어 있지 않을 경우, 확대해석은 심각한 오차를 유발할 수도 있다. 두번째는 귀납적인 방법이다. 이방식은 입력변수의 상대의 모든 가능한 조합을 열거하고, 각 조합의 적절한 출력상태를 결정한다. 이것은 완전한 decision table을 보장한다. 어느 부품이 N개의 입력변수와 각각은 X_i 상태를 갖는다면, 이부품의 decision table은 입력조합의 $X_1 \times X_2 \times X_3 \dots X_N$ 개의 열을 갖는다. 어느부품이 한개이상의 출력을 갖는다면, 출력의 수만큼의 decision table로서 모델화 된다. 예를들면, 열교환기로 부터 나오는 유체의 온도와 유량에 관해서 해석한다면, 시스템에 2개의 가상적인 열교환기가 있는것으로 취급한다. 유량은 한 decision table의 출력이 되고, 온도는 또다른 decision table의 출력이 된다.

VI. 질산 냉각 시스템에의 응용

위에서 논의된 사항을 가지고 그림1과 같은 질산 냉각 시스템에 적용시켜, 부품의 모델과 시스템의 결합을 이끄는 기본사상들의 조합을 체계적인 방법으로 찾아본다.

온도는 feedback loop를 갖고, 펌프제어는 feed forward loop를 갖는 질산 냉각 시스템이 그림 1에 나타나있다. 이 시스템은 고온의 질산을 니트로 벤젠을 만들기 위해 벤젠과 반응하기 전에 냉각시킨다. 이 시스템의 정상사상은 반응기에 공급되는 질산이 고온으로 되는것이다. Feedback control loop는 질산의 온도를 제어하고, feed forward loop는 펌프 정지시 질산의 흐름을 막는

다. 고온의 질산과 냉각수의 교란은 심하지 않은 것으로 가정한다.

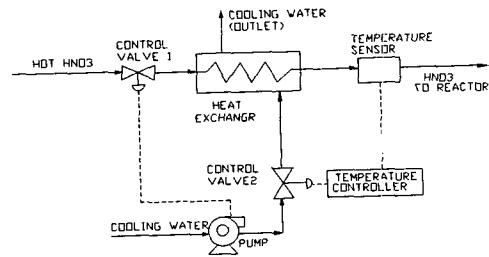


그림 1. 제어 루프가 있는 질산 냉각 시스템

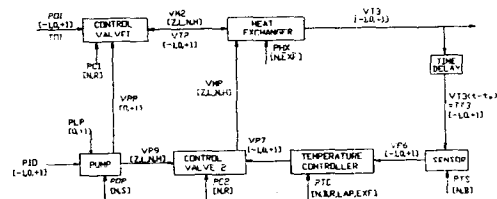


그림 2. 질산 냉각 시스템 선도

그림 2는 이 공정에 대한 시스템 계통도이다. 이 공정의 dominant lag는 온도측정에서의 time lag이고, 이것은 가상적인 부품의 time delay로 나타난다. 시스템의 모든 변수와 상태는 시스템의 계통도에 표기되어 있고, 변수들의 정의는 다음과 같다.

- PO1 : Pressure of hot nitric acid stream
- P10 : Cooling water pressure
- PC1 : Internal mode of control valve 1
- PC2 : Internal mode of control valve 2
- PHX : Internal mode of heat exchanger
- PLP : Pump shutdown transmission line
- POP : Internal mode of pump

PTC : Internal mode of temperature controller
 PTS : Internal mode of sensor
 t : Discrete time
 tP : Time leg of temperature control loop
 TO1 : Temperature of hot nitric acid
 TT3 : Temperature of nitric acid feed at (t - tp) = VT3(t - tp)
 VM2 : Mass flow of hot nitric acid to heat exchanger
 VM8 : Mass flow of cooling water to heat exchanger
 VP6 : Output signal of sensor
 VP7 : Output signal of temperature controller
 VP9 : Cooling water of pressure from pump
 VPP : Pump shutdown signal
 VT2 : Temperature of hot nitric acid
 VT3 : Temperature of nitric acid feed at time t

장치, 온도, 압력, 신호 및 유량에 대한 상태는 다음과 같다.

-1 : Low
 0 : Normal
 +1 : High (Plugged for PLP)
 B : Broken
 EXF : External fire at location of equipment
 H : High
 L : Low
 LAP : Low air pressure
 N : Normal
 S : Shutdown
 R : Reverse
 Z : Zero
 - : Don't care

이 시스템은 그림3과 같이 각 부품에 대한 변수들을 추출하고, 그 변수들간의 관계 즉, 영향과 방향을 나타낼 수 있다. 이 사상을 기초로 표5와 같

은 각 부품의 decision table을 구성할 수 있고, 부품간의 연계를 이룰 수 있다.

질산 냉각 시스템의 입력자료는 반응기에 들어가는 질산이 고온이 되는 상태(VT3(+1))에 대한 critical transition table을 구성하는데-본 논문에서는 생략한다. -사용된다. 질산 냉각 시스템의 critical transition table은 232개의 결합형태로 구성되어 있다. 이중 84개의 최소 결합형태는 여분의 항들을 갖고있으며, 단지 29개만이 여분의 항이 없다. 표6은 최종사상에 대한 prime implicant이다. 29개의 고장형태로 부터 46개의 prime implicant가 생성되며, 이는 전체적으로 75개의 prime implicant를 생성한다.

표의 첫번째 prime implicant(POP(S)*PLP(+1))는 펌프는 정지했으나, 제어밸브1에 대한 전달선의 신호가 계속될때 나타나는 사상이다. 즉, 냉각수의 흐름은 정지했으나, 질산의 흐름을 정지시키는 시스템이 고장난 것이다. 이상황은 당연히 T3(+1)의 사상을 유발 시킨다.

두번째 prime implicant(PCI(R)*POP(S))는 제어밸브1이 역으로 작용하고, 펌프가 정지된 형태이다. 펌프정지 제어는 냉각공정의 질산의 흐름을 정지 시켜야 하나, 밸브가 역으로 작용하기 때문에 질산의 흐름이 최고치로 증가된다. 한편, 제어밸브 1의 정상적인 작동이 중요하게 여겨진다. Reversed action은 표 6에서 많은 경태의 결합을 유도한다. 따라서, 정확한 점검으로 사고의 가능성을 줄일 수 있다. 그리고, 고온의 질산 또한 중요한 역할을 한다. 시스템 개선의 한 방법으로 온도에 민감한 cutoff 밸브의 설치를 고려해 볼 수 있다. 이와같이 전 prime implicant도 각각 물리적 상황을 그차체로 설명되어 질 수 있으며, 시스템의 개선의 지표가 될 수 있다.

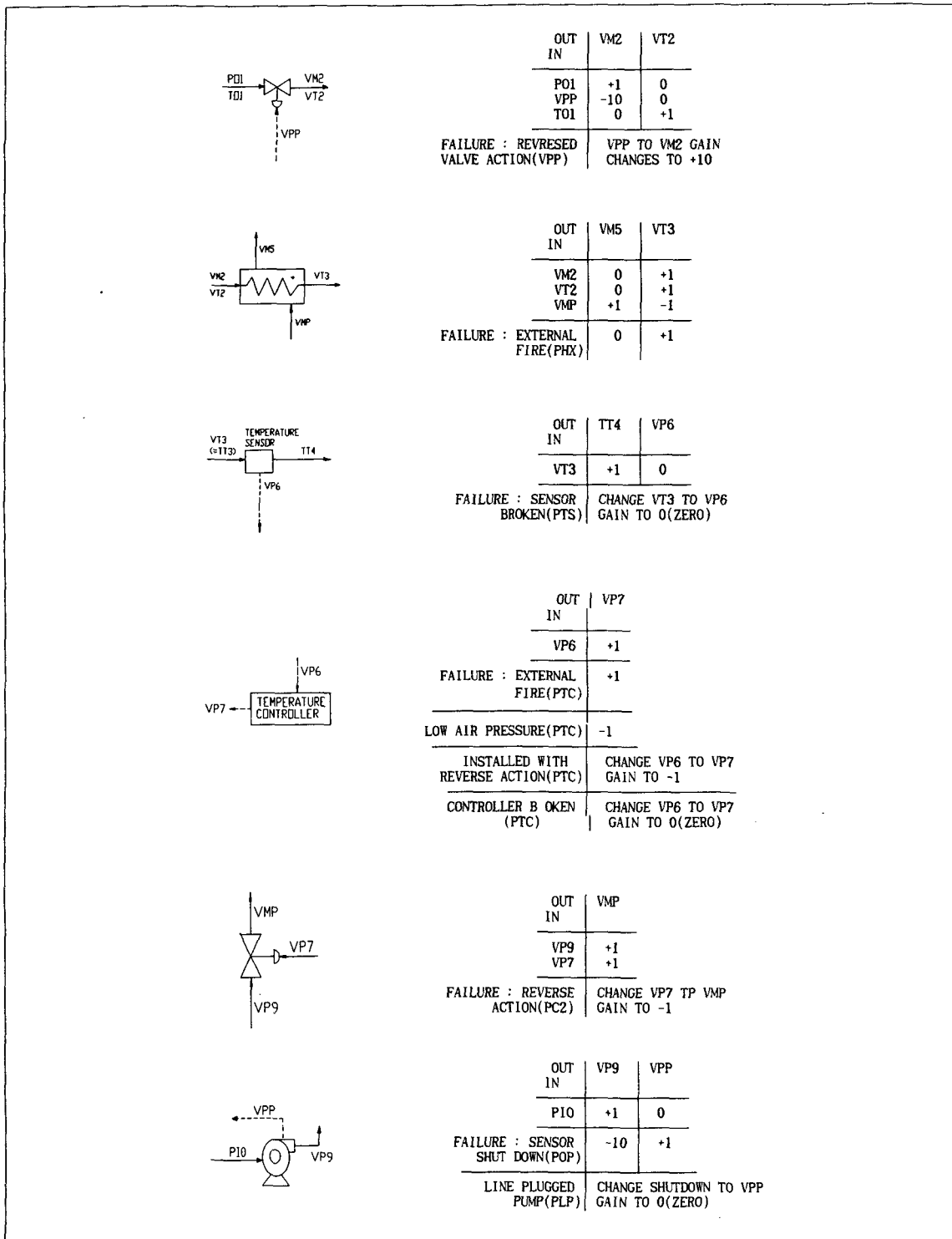


그림 3. 질산 냉각 시스템에서 부품의 입/출력 모델⁷⁾

표 5. 질산 냉각 시스템의 부품에 대한 Decision Table

제어 밸브 1의 Decision Table(Flow Rate)	온도 센서의 Decision Table	열교환기의 Decision Table	온도 제어기의 Decision Table
: PC1: PO1: TO1: VPP: VM2:	: PTS: TT4: VP6:	: PHX: VM2: VT2: VM8: VT4:	: PTC: VP6: VP7:
: N: - : - : +1: Z:	: N: -1: -1:	: N: Z: -1: Z: -1:	: EXF: -1: +1:
: N: -1: - : 0: L:	: B: -1: 0:	: N: L: -1: Z: +1:	: LAP: -1: -1:
: N: 0: - : 0: N:	: N: 0: 0:	: N: N: -1: Z: +1:	: R: -1: +1:
: N: +1: - : 0: H:	: B: 0: 0:	: N: H: -1: Z: +1:	: B: -1: 0:
: R: -1: - : 0: L:	: N: +1: +1:	: N: Z: 0: Z: -1:	: N: -1: -1:
: R: 0: - : 0: N:	: B: +1: 0:	: N: L: 0: Z: +1:	: EXF: 0: +1:
: R: +1: - : 0: H:		: N: N: 0: Z: +1:	: LAP: 0: -1:
: R: -1: - : +1: L:		: N: H: 0: Z: +1:	: R: 0: 0:
: R: 0: - : +1: N:		: N: Z: +1: Z: -1:	: B: 0: 0:
: R: +1: - : +1: H:		: N: L: +1: Z: +1:	: N: 0: 0:
		: N: N: +1: Z: +1:	: EXF: +1: +1:
펌프의 Decision Table (제어 밸브 1)	펌프의 Decision Table (제어 밸브 2)	: N: H: +1: Z: +1:	: LAP: +1: -1:
: PIO: POP: PLP: VPP:	: PIO: POP: PLP: VP9:	: N: Z: -1: L: -1:	: R: +1: -1:
: -1: N: 0: 0:	: -1: N: - : L:	: N: L: -1: L: -1:	: B: +1: 0:
: 0: N: 0: 0:	: 0: N: - : N:	: N: N: -1: L: 0:	: N: +1: +1:
: +1: N: 0: 0:	: +1: N: - : H:	: N: H: -1: L: +1:	
: - : S: 0: +1:	: - : S: - : Z:	: N: Z: 0: L: -1:	
: - : - : +1: 0:		: N: L: 0: L: 0:	
		: N: N: 0: L: +1:	
제어 밸브 1의 Decision Table (온도)	제어 밸브 2의 Decision Table	: N: H: 0: L: +1:	
: PC1: PO1: TO1: VPP: VT2:	: VP9: VP7: PC2: VM8:	: N: Z: +1: L: -1:	
: N: -1: -1: 0: -1:	: Z: - : - : Z:	: N: L: +1: L: +1:	
: R: -1: -1: 0: -1:	: L: -1: N: L:	: N: N: +1: L: +1:	
: N: 0: -1: 0: -1:	: N: -1: N: L:	: N: H: +1: L: +1:	
: R: 0: -1: 0: -1:	: H: -1: N: L:	: N: Z: -1: N: -1:	
: N: +1: -1: 0: -1:	: L: 0: N: L:	: N: L: -1: N: -1:	
: R: +1: -1: 0: -1:	: N: 0: N: N:	: N: H: -1: N: 0:	
: N: -1: 0: 0: 0:	: H: 0: N: H:	: N: Z: 0: N: -1:	
: R: -1: 0: 0: 0:	: L: +1: N: L:	: N: L: 0: N: -1:	
: N: 0: 0: 0: 0:	: N: +1: N: N:	: N: N: 0: N: 0:	
: R: 0: 0: 0: 0:	: H: +1: N: H:	: N: H: 0: N: +1:	
: N: +1: 0: 0: 0:	: L: -1: R: L:	: N: Z: +1: N: -1:	
: R: +1: 0: 0: 0:	: N: -1: R: N:	: N: L: +1: N: 0:	
: N: -1: +1: 0: +1:	: H: -1: R: H:	: N: N: +1: N: +1:	
: R: -1: +1: 0: +1:	: L: 0: R: L:	: N: H: +1: N: +1:	
: N: 0: +1: 0: +1:	: N: 0: R: N:	: N: Z: -1: H: -1:	
: R: 0: +1: 0: +1:	: H: 0: R: H:	: N: N: -1: H: -1:	
: N: +1: +1: 0: +1:	: L: +1: R: L:	: N: H: -1: H: -1:	
: R: +1: +1: 0: +1:	: N: +1: R: L:	: N: Z: 0: H: -1:	
: N: -1: -1: +1: -1:	: H: +1: R: L:	: N: L: 0: H: -1:	
: R: -1: -1: +1: -1:		: N: N: 0: H: -1:	
: N: 0: -1: +1: -1:		: N: H: 0: H: 0:	
: R: 0: -1: +1: -1:		: N: Z: +1: H: -1:	
: N: +1: -1: +1: -1:		: N: L: +1: H: -1:	
: R: +1: -1: +1: -1:		: N: N: +1: H: 0:	
: N: -1: 0: +1: 0:		: N: H: +1: H: +1:	
: R: -1: 0: +1: 0:		: EXF: - : - : +1:	
: N: 0: 0: +1: 0:			
: R: 0: 0: +1: 0:			
: N: +1: 0: +1: 0:			
: R: +1: 0: +1: 0:			
: N: -1: +1: +1: +1:			
: R: -1: +1: +1: +1:			
: N: 0: +1: +1: +1:			
: R: 0: +1: +1: +1:			
: N: +1: +1: +1: +1:			
: R: +1: +1: +1: +1:			

VI. 결 론

본 연구는 석유/화학 공장에서 위험성 평가에 관한 방법중 decision table을 이용한 최종적인 재해를 이끄는 기본 부품의 결합들의 원인적 관계에 관하여 논하였고, 이를 찾아내는 방법을 부품의 모델링과 이들의 연계를 통하여 제시하였다. 그리고, 제어루프가 있는 질산 냉각 시스템을 예로 prime implicant를 찾았다. 이 prime implicant는 기본사상들의 유일한 결합 형태의 집합으로 시스템의 개선이나, 안전도 해석 그리고 확률 계산에 이용할 수 있다.

FT는 작동과 결합이라는 2개의 사상만이 입력으로 사용되는 것에 비해 decision table은 부분적인 작동 상태를 추가할 수 있으므로 해서 보다 완벽한 결합 형태의 연계를 찾을 수 있다. 또한 복잡한 시스템에 FT의 구성은 많은 시간이 요하는데 비해서 이 방법은 빠른 시간에, 쉽게 수행할 수 있다.

참 고 문 헌

1. E.J. Henley, H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall 1981
2. 김진근, 김광일, "석유/화학 공장에서의 위험성 평가에 관한 연구 : PART 1 화재폭발 지수", 한국항공대학교 논문집, 제30집, 1992
3. I.E. Ogunbiyi, "Application of Decision Tables to Risk Analysis Studies", Ph. D thesis, 1980
4. D.F. Hassl, "Advanced Concepts in Fault Tree Analysis", System Safety Symposium, Seattle, 1965
5. Reactor Safety Study-An Assessment of Accident Risk in U.S. commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400(NUREG-75/014), U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1975
6. J.B. Fussell, G.J. Powers, R.G. Bennetts, "Fault Trees-A State of Art Discussion", IEEE Trans. on Reliability, vol. R-23, No.1, 1974
7. J.B. fussell, "Synthetic Tree Model-A Formal Mothodology for Fault Tree Construction", ANCR-1098, 1976
8. G.J. Powers, F.C. Tompkins, "Fault Tree Synthesis for Chemical Processe", AIChE Journal, vol.20, No.2, 1974
9. G.E. Apostolakis, S.L. Salem, J.S. Wu, "CAT : A Computer Code for the Automated Construction of Fault Tree", EPRI Report, 1978
10. H. Kumamoto, E.J. Henley, "Safety and Reliability Synthesis of system with Control Loop", AIChE Journal, vol.R-26, 1977
11. W.V. Quine, "A Way to Simplify Truth Functions", American Mathematical Monthly, vol.62, 1955
12. W.V. Quine, "The Problem of Simplifying Truth Functions", American Mathematical Monthly, vol.62, 1955
13. W.V. Quine "On Cores and Implicants of Truth Functions", American Mathematical Monthly, vol.62, 1955
14. IEEE Standards Committee, IEEE Trial-Use Guide : General Principles for Reliability Analysis of nUclear Power Generating Station Protection System, IEEE Std. 352, 1972
15. G.J. Powers, F.C. Tompkins, "Fault Tree Synthesis", NATO Conf. on reliablioty, Liverpool, England, 1973
16. G.J. Powers, "Safety and Reliability Analysis", Course Notes in Advanced Process Synthesis, Mass. Inst. Tech. Cambridge, 1973